

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 19820091152523

UDC _____

廈門大學

碩 士 學 位 論 文

GaN 基微型核電池的研究

Study of GaN Betavoltaic Microbattery

戴昌鴻

指導教師姓名: 郭航 教授

專 業 名 稱: 凝聚態物理

論文提交日期: 2012 年 月

論文答辯時間: 2012 年 月

學位授予日期: 2012 年 月

答辯委員會主席: _____

評 閱 人: _____

2012 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

- () 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于
 年 月 日解密，解密后适用上述授权。
- () 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

微型核电池由于具有能量密度大、寿命长、受环境影响小、与 MEMS 工艺兼容等优点,成为了为 MEMS 和微/纳器件供电的重要选项。Si 基微型核电池由于受到 Si 材料禁带宽度的限制,输出电压和转换效率仍较低。GaN 是一种宽禁带半导体材料,基于 GaN 的微型核电池有更大的开路电压和更高的转换效率。本文对采用 Pm-147 作为放射源的 GaN 微型核电池进行了研究。

首先,对基于 Pm-147 的 GaN 微型核电池进行了理论分析。通过求解少数载流子连续性方程得到了辐生电流密度的计算公式,并推导出了与实验值相符合的 GaN 少子迁移率、少子寿命和少子扩散长度公式。在这些计算的基础上,对 GaN 微型核电池的性能进行数值模拟。分析了禁带宽度、掺杂浓度、结深、表面复合速率和耗尽区宽度对 GaN 微型核电池输出性能的影响,得到了使电池性能最佳的参数值,为后续的实验制造提供了重要参考。

在此基础上,进行了 GaN 微型核电池的制造与测试。先使用 MOCVD 生长了 GaN 晶体薄膜,使用 XRD、AFM、PL、霍尔效应等方法对其进行表征和测试。然后使用 MEMS 工艺制造了 GaN 微型核电池,并在暗环境和紫外环境下对其进行了测试。结果显示,电池的性能优良。

最后,进行了以多孔氧化铝作为 ICP 刻蚀掩膜制备多孔 GaN 的实验。先在 GaN 表面蒸发一层铝膜,并使用两步氧化法得到多孔氧化铝。然后用该氧化铝作为刻蚀掩膜,使用 ICP 刻蚀制备了形貌良好的多孔 GaN。多孔 GaN 的纳米级孔可以产生能带展宽效应,并且能减小对 β 粒子的反射率,以其作为基底将可以改善 GaN 微型核电池的输出性能。

关键词: GaN; 微型核电池; Pm-147; 多孔氧化铝; 多孔 GaN

Abstract

Betavoltaic Microbattery is an important power supply for MEMS and micro/nano devices due to its advantages of high energy density, long lifetime, free from environment influence, easy to miniaturization and integration. The open-circuit voltage and conversion efficiency of Si-based batteries are low because of the narrow band gap of Si. GaN (gallium nitride) betavoltaic microbattery has higher open-circuit voltage and conversion efficiency due to the wide band gap of GaN. GaN betavoltaic microbatteries based on Pm-147 are studied in this thesis.

Firstly, theoretical study of GaN betavoltaic microbattery is presented. The formula of radiation generated current density is derived by solving the minority carrier continuity equation. The formulae of minority mobility, lifetime and diffusion length are derived and they are identical to the experimental data. Based on this calculation, the simulation is carried out. The influences of band gap, carrier concentration, junction depth, surface recombination velocity and depletion region width to the output performance of GaN betavoltaic microbattery are analyzed, and the optimized value of the parameters are obtained. These studies can offer useful direction to experimental fabrication.

Based on the theoretical study, GaN betavoltaic microbatteries are fabricated and tested. GaN thin films are deposited by MOCVD and characterized by XRD, AFM, PL and Hall Effect. GaN betavoltaic microbatteries are fabricated by MEMS processes and tested in dark environment and under ultraviolet illumination. The results show that the performances of the batteries are good.

Finally, porous GaN is fabricated by using porous alumina as the etching mask. A thin film of aluminum is evaporated on GaN substrate and then oxidized into porous alumina by means of two-step oxidation. After that, well-arrayed porous GaN is obtained by ICP etching using the porous alumina thin film as the mask. Betavoltaic microbatteries based on porous

GaN can achieve a better output performance because the nano scale effect of porous GaN can widen the band gap of GaN and reduce the reflection of beta particles.

Keywords: GaN; betavoltaic microbattery; Pm-147; porous alumina; porous GaN

厦门大学博硕士论文摘要库

目 录

摘要.....	I
Abstract.....	II
第一章 绪论.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 核电池的定义和分类.....	1
1.2.1 直接转换核电池.....	2
1.2.2 间接转换核电池.....	2
1.2.3 直接充电核电池.....	3
1.3 辐射安全分析.....	3
1.3.1 辐射的计量单位.....	4
1.3.2 放射源的分类.....	5
1.3.3 安全剂量.....	5
1.4 β 辐生伏特核电池的发展历程.....	6
1.5 本论文的研究目的与意义.....	8
第二章 GaN 微型核电池的理论分析.....	10
2.1 微型核电池的基本原理.....	10
2.2 GaN 微型核电池的辐生电流方程.....	10
2.2.1 GaN 微型核电池的基本结构和一维模型.....	11
2.2.2 GaN 微型核电池的等效电路和特征参数.....	12
2.2.3 GaN 微型核电池的辐生电流方程.....	15
2.3 GaN 微型核电池理论分析中相关参数的计算.....	19
2.3.1 GaN 少子迁移率的计算.....	19
2.3.2 GaN 少子寿命的计算.....	22
2.3.3 GaN 少子扩散长度的计算.....	24

2.3.4 放射性同位素的选择及其 β 谱	25
2.3.5 β 粒子在 GaN 中的射程	27
2.3.6 β 粒子的吸收系数	29
2.4 GaN 微型核电池的理论分析结果	29
2.4.1 禁带宽度对微型核电池输出性能的影响	30
2.4.2 掺杂浓度对 GaN 微型核电池输出性能的影响	34
2.4.3 结深对 GaN 微型核电池输出性能的影响	38
2.4.4 表面背面复合速率对 GaN 微型核电池输出性能的影响	40
2.4.5 耗尽区宽度对 GaN 微型核电池输出性能的影响	42
2.5 本章小结	44
第三章 GaN 微型核电池的制造与测试	45
3.1 GaN 晶体生长与表征	45
3.1.2 GaN 薄膜的生长	45
3.1.2 GaN 晶体薄膜的表征	47
3.2 GaN 微型核电池的制造	56
3.2.1 4 种 GaN 微型核电池的结构	56
3.2.2 掩膜版的设计和制造工艺流程	56
3.2.3 GaN 微型核电池的制造	57
3.3 GaN 微型核电池的测试与封装	63
3.3.1 GaN 微型核电池的测试	63
3.3.2 GaN 微型核电池的划片与封装	68
3.4 本章小结	70
第四章 基于多孔氧化铝制备多孔 GaN 的研究	71
4.1 多孔 GaN	71
4.1.1 多孔 GaN 的能带展宽效应	71
4.1.2 多孔 GaN 减小 β 粒子的反射率	75
4.2 多孔氧化铝简介	76

4.2.1 多孔氧化铝的形成机理	76
4.3 多孔 GaN 的制备	79
4.3.1 多孔 GaN 的制备流程	79
4.3.2 多孔 GaN 的制备实验	80
4.4 本章小结	89
第五章 总结和展望	90
5.1 本文内容总结	90
5.2 后续工作展望	91
参考文献	92
作者攻读硕士学位期间发表的论文	99
致谢	100

Contents

Chapter 1 Preface	1
1.1 Introduction	1
1.2 Definition and Classification of Nuclear Battery.....	1
1.2.1 Direct Conversion Nuclear Battery	2
1.2.2 Indirect Conversion Nuclear Battery.....	2
1.2.3 Direct Charge Nuclear Battery	3
1.3 Radiation Safety	3
1.3.1 Radiation Measurement.....	4
1.3.2 Radioisotope Classification.....	5
1.3.3 Safe Dosage.....	5
1.4 Development of Betavoltaic Battery	6
1.5 Research Purpose	8
Chapter 2 Theoretical Study of GaN Betavoltaic Microbattery	10
2.1 Basic Principles of Betavoltaic Microbattery	10
2.2 Calculation of Radiation Generated Current	10
2.2.1 Basic Structure and One-Dimensional Model.....	11
2.2.2 Equivalent Circuit and Characteristic Parameters.....	12
2.2.3 Radiation Generated Current Equation	15
2.3 Calculation of Characteristic Parameters.....	19
2.3.1 Calculation of GaN Minority Carrier Mobility	19
2.3.2 Calculation of GaN Minority Carrier Lifetime	22
2.3.3 Calculation of GaN Minority Diffusion Length.....	24
2.3.4 Radioisotope and Energy Spectrum	25

2.3.5 Penetration Depth of Beta Particles.....	27
2.3.6 Absorption Coefficient of Beta Particles.....	29
2.4 Results of Theoretical Study.....	29
2.4.1 Influence of Semiconductor Band Gap.....	30
2.4.2 Influence of Carrier Concentration.....	34
2.4.3 Influence of Junction Depth.....	38
2.4.4 Influence of Surface and Back Recombination Velocity.....	40
2.4.5 Influence of Depletion Region Width.....	42
2.5 Summary.....	44
Chapter 3 Fabrication and Test of GaN Betavoltaic Microbattery.....	45
3.1 Growth and Characterization of GaN Thin Film.....	45
3.1.2 Growth.....	45
3.1.2 Characterization.....	47
3.2 Fabrication of GaN Betavoltaic Microbattery.....	56
3.2.1 Structures.....	56
3.2.2 Design.....	56
3.2.3 Fabrication.....	57
3.3 Test and Package of GaN Betavoltaic Microbattery.....	63
3.3.1 Test.....	63
3.3.2 Scribe and Package.....	68
3.4 Summary.....	70
Chapter 4 Fabrication of Porous GaN Based on Porous Alumina.....	71
4.1 Porous GaN.....	71
4.1.1 Band Gap Expanding.....	71
4.1.2 Reduction of β Particle Reflection.....	75
4.2 Introduction of Porous Alumina.....	76
4.2.1 Mechanism of Porous Alumina Formation.....	76
4.3 Fabrication of Porous GaN.....	79

4.3.1 Processes	79
4.3.2 Fabrication.....	80
4.4 Summary	89
Chapter 5 Results and Discussion	90
5.1 Results.....	90
5.2 Discussion	91
References	92
Publications	99
Acknowledgements.....	100

第一章 绪论

本章将讲述微型核电池对于 MEMS（微机电系统）和微/纳器件能源供应的重要性，并对核电池的安全性进行分析。然后对核电池的分类和发展历程进行介绍和回顾，指出对 GaN 微型核电池进行理论和实验研究的重要性。最后将介绍本论文的主要内容。

1.1 引言

MEMS（Micro-Electro-Mechanical Systems）技术，即微机电系统技术将微型机械、微传感器、微执行器、信号处理和智能控制集成在一起，形成了高度集成的功能单元。Roylance L 等人在 1978 制造出了第一个加速度传感器^[1]。随着 1982 年 K. E. Peterson 的经典论文“Silicon as a Mechanical Material”的发表，“微机械”一词开始出现并流行^[2]。而 1989 年加州大学伯克利分校的微型马达的研制成功则将 MEMS 技术推向了一个新的高潮^[3]。如今，MEMS 技术已经日趋成熟，并成功的在环境保护和检测、生物科学研究、医药用设备仪器以及无线通讯光通讯等方面得到应用。由于 MEMS 器件具有高度集成、体积小并常用在特殊场合（比如放置于高山深海的传感器、植入人体的微型治疗器械）的特点，这就要求它的供能装置应具有易于集成、能量密度高、易小型化、寿命长且环境适应强的特点。传统的太阳电池、化学燃料电池和锂电池等已经不能很好的满足这一需求，这就要求人们找到新的供能装置^[4]。由于微型核电池具有与 MEMS 相适应的诸多优点，近年来它吸引了越来越多的研究人员的关注。下面将详细介绍核电池的定义和分类以及发展历程。

1.2 核电池的定义和分类

核电池，也被称为同位素电池，是将放射性同位素衰变释放的能量转换为电能的装置。根据产生电能的方式不同，核电池可以分为以下三类：直接转换核电池、间接转换核电池和直接充电核电池。

1.2.1 直接转换核电池

直接转换核电池是指能够直接将放射性同位素衰变辐射出的能量转换为电能的核电池。辐生伏特核电池是最重要也是应用最广泛的直接转换核电池。另外一种直接转换核电池接触电势差核电池则由于体积和电阻抗较大而限制了其的实际应用^[5]。下面着重介绍一下辐生伏特核电池，因为这也是本文研究的核电池所属的类型。

辐生伏特核电池是指通过辐生伏特效应来将放射性同位素衰变辐射出来的能量转换为电能的装置。辐生伏特效应与光伏效应的工作原理类似，放射性同位素辐射出来的 α 或 β 粒子（对应于光伏电池中的光子）入射到半导体材料中激发电子-空穴对，这些电子-空穴对被半导体整流结（包括 p-n 结、p-i-n 结和肖特基结）的内建电场分离，电子流向一边，而空穴流向另一边，从而在半导体结的两端形成电势差。

由于 α 粒子的动能通常都在 4-9MeV^[6]，远大于一般半导体的损伤能量阈值^[7]，所以辐生伏特核电池通常采用粒子动能相对较小的 β 同位素作为放射源，这种核电池叫做 β 辐生伏特核电池（betavoltaic battery）。本文中所研究的核电池就是这种核电池。

按照器件结构的不同， β 辐生伏特核电池可以分为 p-n 结型、p-i-n 结型和肖特基结型核电池。根据采用的半导体材料的不同，则可以分为 Si 核电池、SiC 核电池、铝镓砷核电池和 GaN 核电池等。图 1-1 是一种典型的 p-n 结型 β 辐生伏特核电池的示意图。

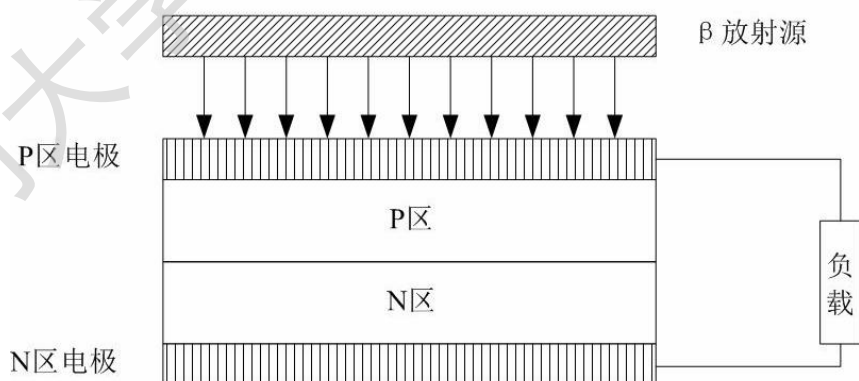


图 1-1 p-n 结型 β 辐生伏特核电池的结构示意图

1.2.2 间接转换核电池

间接转换核电池是指先将放射性同位素衰变能转换成一种中间能量，比如热能或者光能，然后再将这些热能或者光能转换成电能的核电池。比较常见的间接转换核电

池有两种，一种的中间能量是热能，这样的核电池称为温差电偶核电池；另一种的中间能量是光能，这样的核电池称为荧光体光电式核电池。

温差电偶核电池是一种成熟的核电池，它先将放射源直接或者间接产生的能量转换为热能，然后再利用热电材料将这些热能转变为可利用的电能。这种核电池可以达到几百到上千瓦的功率，被广泛应用在宇航科技中^[8]。

荧光体光电式核电池工作时，放射源辐射出的放射线使荧光材料发出荧光，然后荧光在光伏电池中通过光伏效应转换成电能。因为光伏电池对于光强很敏感，光强的降低会极大地降低电池的转换效率。为了延长这种电池的使用寿命，必须要减小放射线对荧光材料的辐射损伤，所以通常这种核电池都选用辐射能量较小的 β 同位素作为放射源。另外，由于与之匹配的光伏电池的转换效率也并不高，加上荧光材料与同位素源的耦合问题，使得该种电池的使用受到很大的制约^[9]。

1.2.3 直接充电核电池

直接充电核电池的工作原理是，使用放射源作为发射极，用一种金属作为收集极，收集极金属常设计成圆球形状将发射极完全包裹在里面。同位素源发射的 α 或者 β 粒子被收集极金属直接收集，从而在发射极和收集极之间产生一个电势差，使其能够成为向外部供能的装置。如果在发射极和收集极之间加入固体电解质，则会极大的阻碍 α 或者 β 粒子的传递。但是如果采用真空环境，那么在维持高真空方面又存在技术难度和成本问题，所以该种核电池的实际应用也受到很大制约^[10]。

1.3 辐射安全分析

对于放射性的安全分析，主要是研究人在一个阶段内收到的辐射剂量的大小，如果这个剂量超过了损伤阈值，则会对人的身体健康产生危害；如果没有超过，则一般可以通过修养进行自我恢复。

为了更好的理解辐射剂量的问题，先对辐射的计量单位进行介绍。

1.3.1 辐射的计量单位

1.3.1.1 放射性活度

一定量的放射性核素在一个很短的时间间隔内发生的核衰变数除以该时间间隔叫做放射性活度。在国际单位制中，它的单位是贝可勒尔，简称贝可，符号 Bq。1Bq 等于放射性物质在 1 秒钟内有 1 个原子核发生衰变。表达式如下

$$1\text{Bq} = 1 \text{ 次衰变/秒} \quad (1-1)$$

早期的放射性单位是居里，符号是 Ci，贝可和居里的换算关系如下

$$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{Bq} \quad (1-2)$$

1.3.1.2 半衰期

放射性半衰期是放射性核素因放射性衰变而使其活度降低到原来的一半所经过的时间。一般来说，天然放射性核素的半衰期较长，而多数人工放射性核素的半衰期都较短。

1.3.1.3 放射性剂量

最常用的辐射剂量有 3 个：吸收剂量、当量剂量和有效剂量。

吸收剂量：是指单位质量的组织或器官吸收的辐射能量大小。吸收剂量的单位为戈瑞（符号为 Gy），1Gy 相当于辐射授予每千克质量组织或器官的能量为 1 焦耳。早期使用的吸收剂量单位为拉德（符号为 rad），1Gy=100rad。

当量剂量：是组织或器官接受的平均吸收剂量乘以辐射权重因子后得到的乘积。 α 、 γ 和 β 射线的辐射权重因子为 1，中子的辐射权重因子为 5~20（取决于中子能量）， α 辐射权重因子为 20。当量剂量的单位为希沃特（符号为 Sv）。早期使用的单位为雷姆（符号为 rem），1Sv=100rem。

有效剂量：当要评估辐射可能诱发的晚期损伤效应——癌症时，采用有效剂量这个量。有效剂量定义为各组织的当量剂量和各自的组织权重因子的乘积的总和。组织权重因子用于表示各组织器官对辐射的敏感程度。例如，骨髓和性腺对辐射敏感程度高，权重因子就大；皮肤对辐射不敏感，权重因子就小。有效剂量的单位也是希沃特

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库